

木星型惑星・氷衛星・系外惑星

中島健介・九州大学(木星型惑星大気)

木村淳・北海道大学(氷衛星)

中本泰史・東京工業大学(系外惑星)

三好由純・名古屋大学(木星型惑星電気磁圏)

高橋幸弘・北海道大学

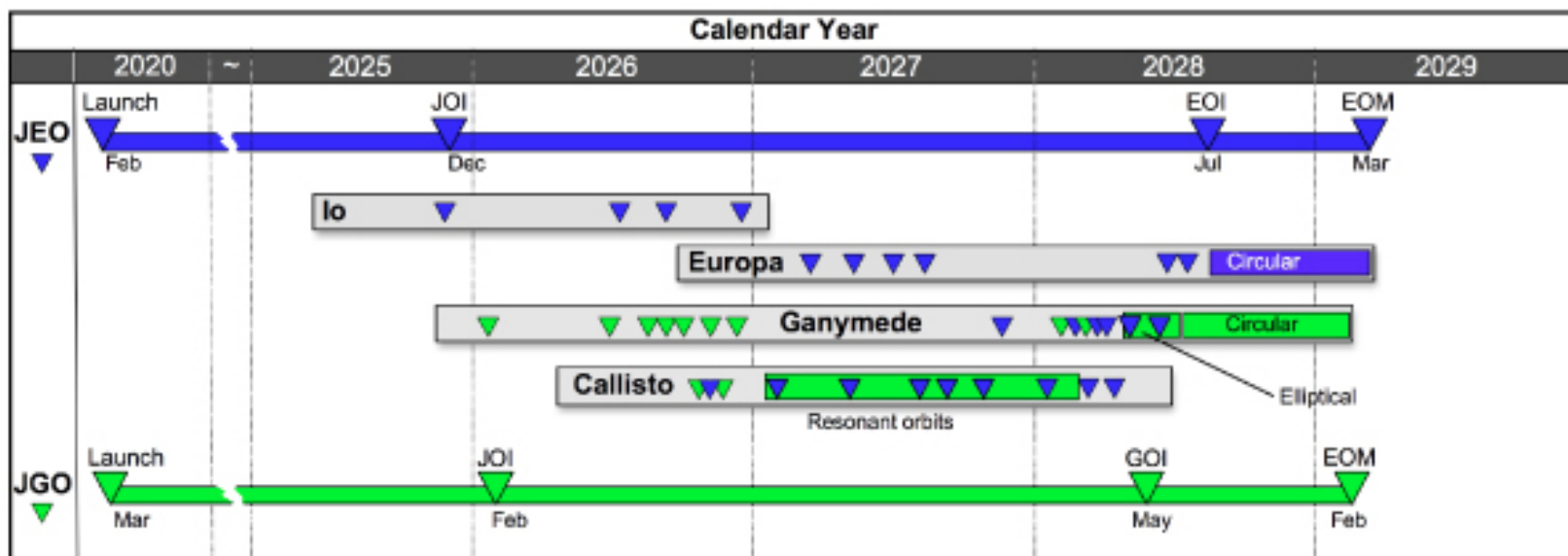
木星探査

EJSM ~2020打上、~2026到着？

JGO: Jupiter Ganymede Orbiter led by ESA

JEO: Jupiter Europa Orbiter led by NASA

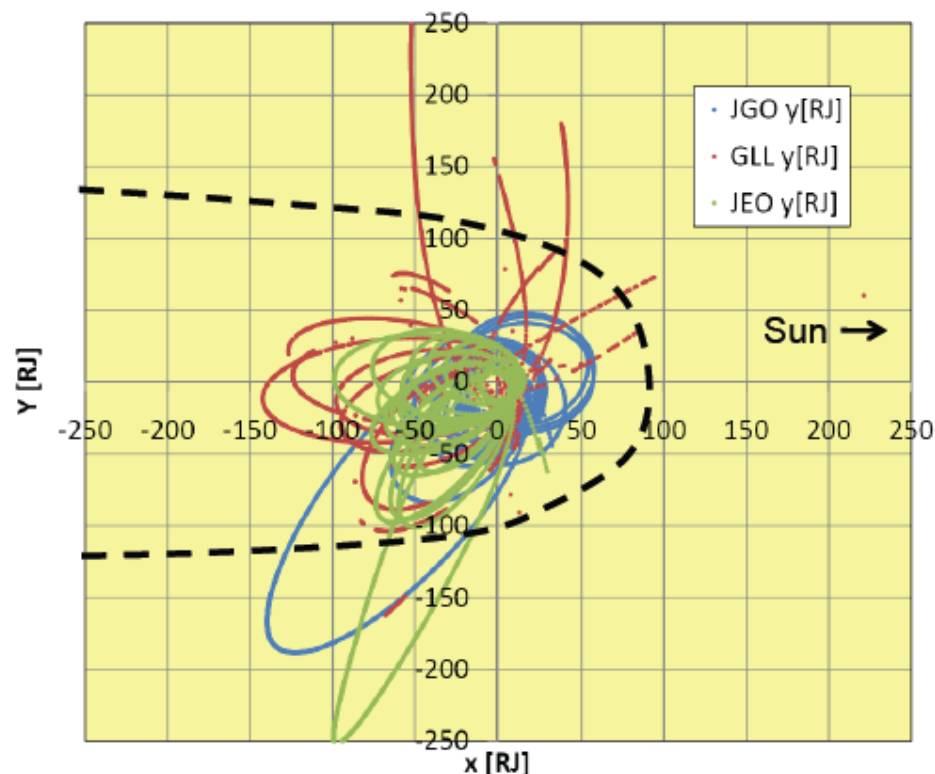
JMO: Jupiter Magnetosphere?? Orbiter



来る10年、という意味では事実上、EJSMで何が出来るか、という話。

JGO outline

- JOI into 13 x 245 RJ (Jupiter radii) elliptical orbit
- Sequence of swing-bys at Ganymede and Callisto Callisto Science Phase (383 days): 19 Callisto flybys at altitude of 200 km using 1:1 and 2:3 resonant orbits, allowing for (quasi) global surface coverage
- Ganymede Orbit Insertion (GOI) into 200 x 6000 km elliptical orbit
- Ganymede elliptical orbit science phase (up to 80 days)
- Maneuver to reach a low altitude (200 km), circular, quasi-polar orbit
- Ganymede circular orbit science phase up to 180 days
- End of nominal mission after about 8.9 years in February 2029



Model Payload (73 kg)

- Micro Laser Altimeter
- Radio Science Package
- Radar Sounder
- VNIR Imaging Spectrometer
- UV Imaging Spectrometer
- Thermal IR Mapper
- Wide Angle and Medium Resolution Camera
- Magnetometer
- Plasma Package
- Sub-mm Wave Sounder

JEO outline

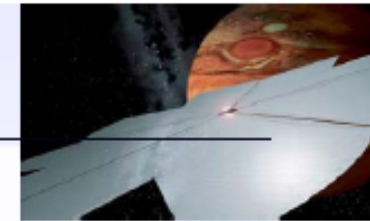
Science Objectives

- A. Europa's Ocean: Characterize the extent of the ocean and its relation to the deeper interior
- B. Europa's Ice Shell: Characterize the ice shell and any subsurface water, including their heterogeneity, and the nature of surface-ice-ocean exchange
- C. Europa's Chemistry: Determine global surface compositions and chemistry, especially as related to habitability
- D. Europa's Geology: Understand the formation of surface features, including sites of recent or current activity, and identify and characterize candidate sites for future in situ exploration
- E. Jupiter System: Understand Europa in the context of the Jupiter system

Model Payload (106 kg)

- Laser Altimeter (LA)
- Radio Science (RS)
- Ice Penetrating Radar (IPR)
- VIS-IR Imaging Spectrometer (VIRIS)
- UV Spectrometer (UVS)
- Ion and Neutral Mass Spectrometer (INMS)
- Thermal Instrument (TI)
- Narrow Angle Camera (NAC)
- Wide Angle Camera and Medium Angle Camera (WAC+MAC)
- Magnetometer (MAG)
- Particle and Plasma Instrument (PPI)

サイエンスからのJMO軌道要求例



木星磁気圏全領域のサーベイ

(1) 初期 – Go into the Inside

- 遠木点 : 100R_j (tbc)
- 近木点 : イオ
- 赤道面 with Multiple satellite flybys

(2) ノミナル – Cover the Distance

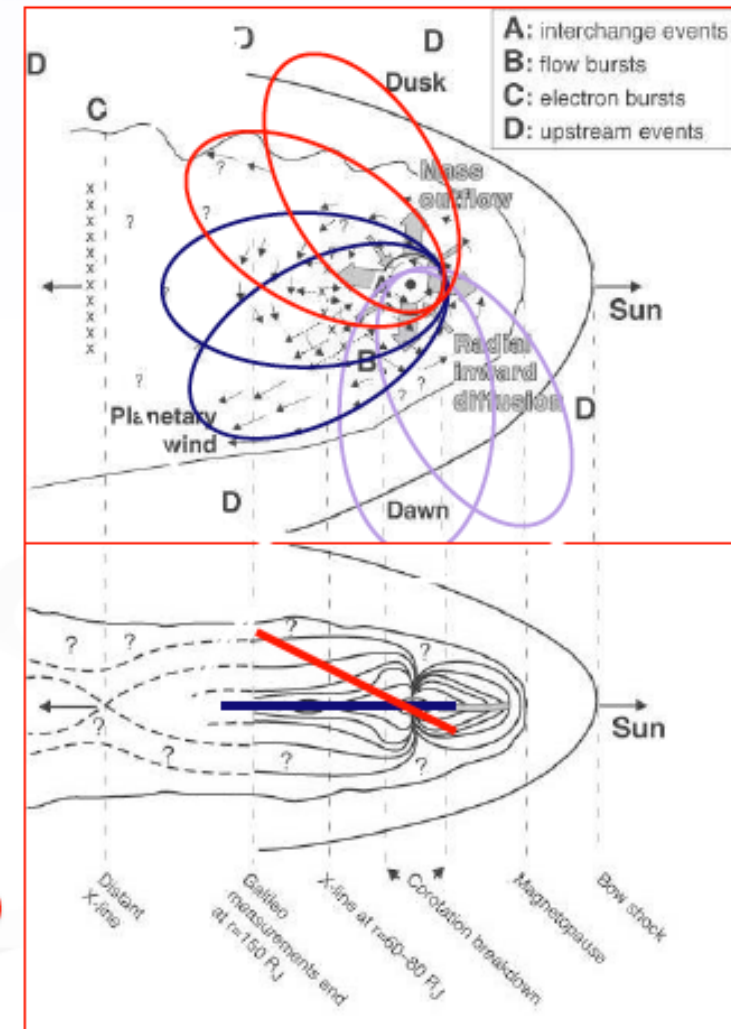
- 遠木点 : 100R_j (tbc)
- 近木点 : エウロパかガニメデ
- 赤道面

JEO – JGOとの共同観測

(3) 最終 – Get the Inclination

- 遠木点 : 100R_j (tbc)
- 近木点 : エウロパかガニメデ
- 衛星フライバイにより軌道を傾斜(~ 15-30deg)

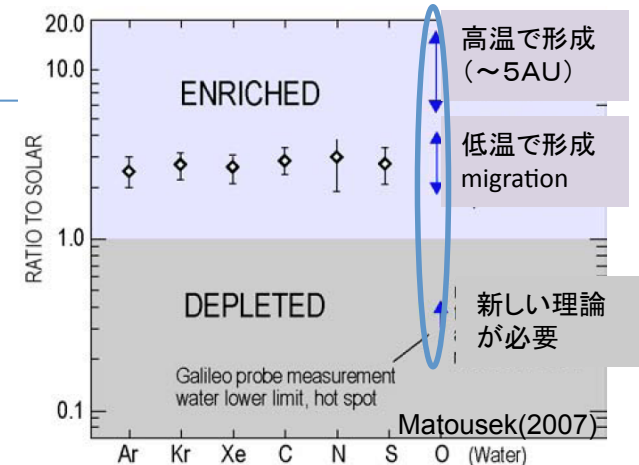
JEO, JGOに比べ軌道傾斜が大きい



木星型惑星大気

惑星科学における木星大気的重要問題

- **組成** : **事実上わかっていない**
 - 惑星組成の代表としての深部大気組成
 - 原始太陽系星雲の進化の解明のために
 - 組成・物質循環 etc.
- **大気の構造と力学**: **理解はまだまだ**
 - 惑星大気重要な end member
 - 汎惑星大気力学の構築に欠かせない
 - 惑星の進化を拘束
 - 雲の組成と量: 反射率・射出率を支配
 - 熱・物質輸送(鉛直・緯度方向)
 - 系外惑星の観測の解釈のために必須
 - 見かけの温度、スペクトル
- **系外の巨大惑星との対応** : **これから**

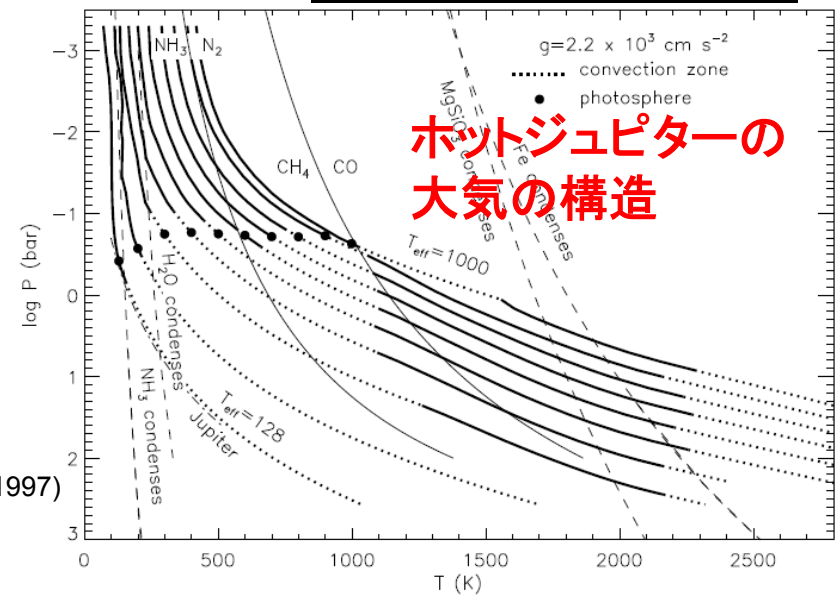
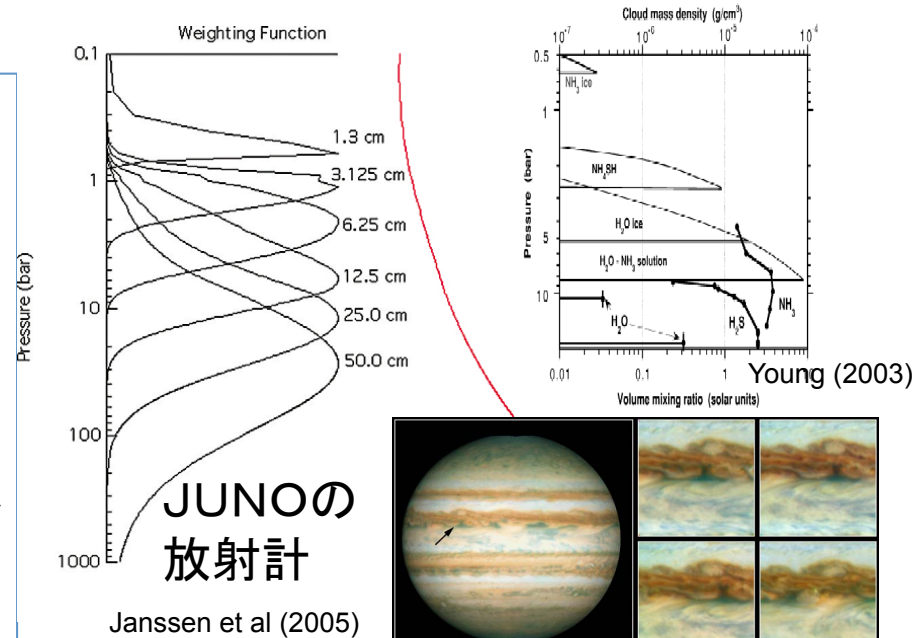


木星大気の水蒸気量と形成シナリオの関係

実は、「太陽系の組成」はまだ不確定性が大きい。太陽の観測でわかるのは、表面の組成。太陽のバルク組成と異なる可能性。木星のバルク組成は、太陽系のバルク組成推定に極めて重要な情報。

近未来の展開： 組成

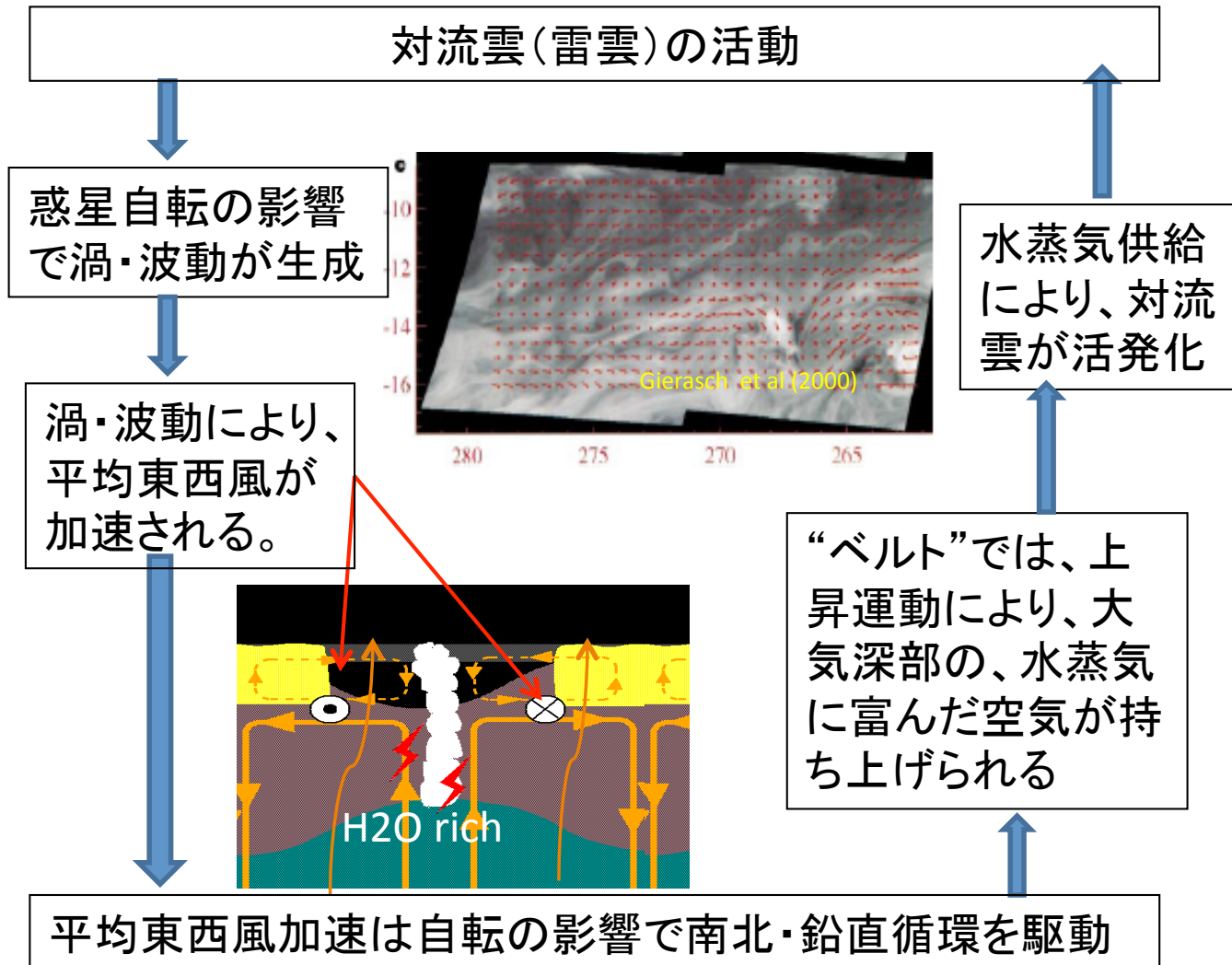
- ガリレオプローブ(1995:過去)
 - 深部水蒸気は代表性なし
- JUNO(2011-2016)
 - マイクロ波で深部のH₂O, NH₃を推定
 - 推定の精度はそれほど高くないが、面的にわかる。
 - 雲 etc. の補助データ必要だが、E JSMが補えば精度改善？
- 系外惑星からのヒント
 - ホットジュピターでは、水蒸気が凝結せず、深部組成がそのまま露出している。
 - 木星も同じと仮定すればヒント！



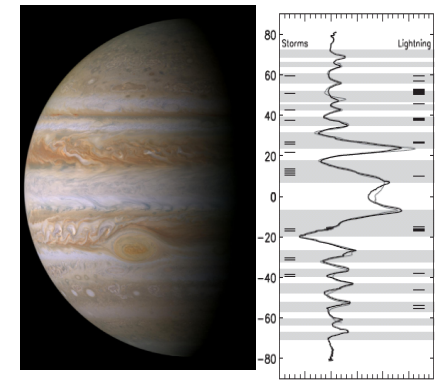
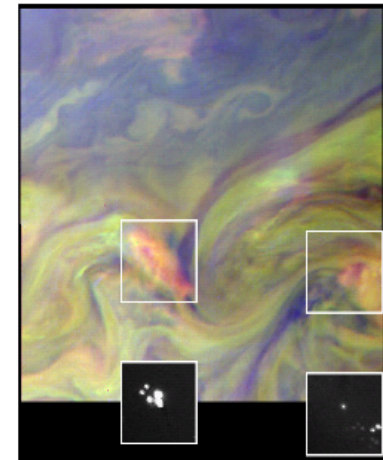
Burrows Et al (1997)

近未来の展開： 大気力学(1)

対流雲・大規模渦・ジェット気流、全てのスケールにわたる相互作用があるらしい。(Gierasch et al, 2000; Ingersoll et al, 2000)



Vasavada and Showman (2005)



Porco et al (2003)

近未来の展開： 大気力学(2)

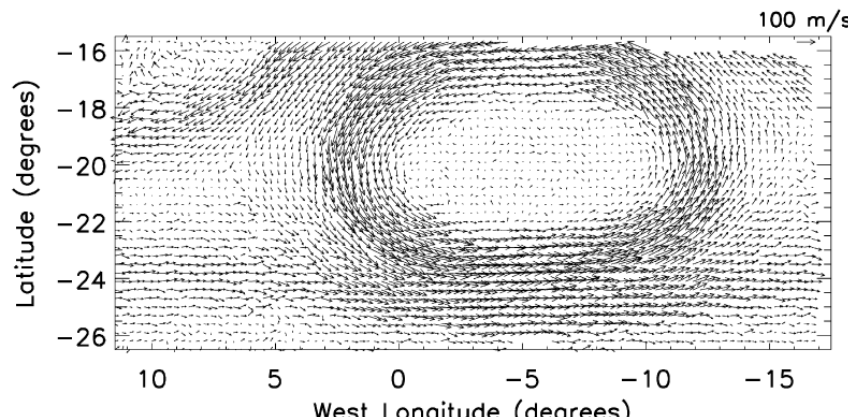
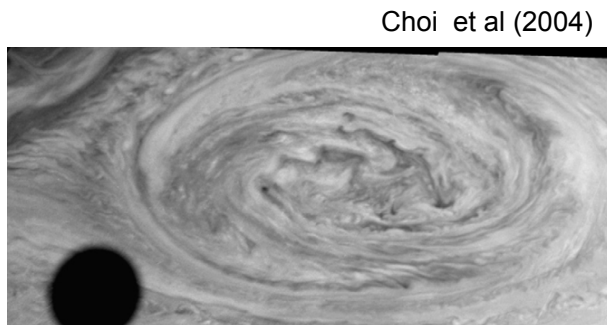
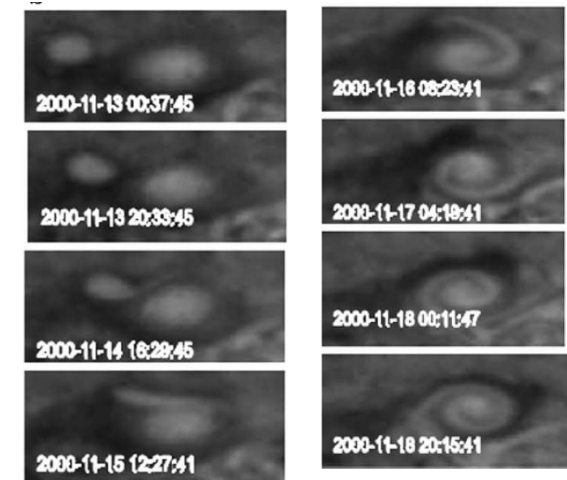
EJSM(2020-2027?): JEO + JGO + JMO

ガリレオ(アンテナ開かず)より桁違いに多いデータが得られる

- 雲・渦・ジェットの間相互作用について

- これまでは形態学だった。
- EJSM後は、力学(風速場・温度場)が定量的に記述できるが、対流圏上部まで。
- 雷放電の深さ(=対流雲の深さ)が推定できれば、重要な情報になる。
- JUNOの重力測定から、ジェットの鉛直構造もわかる可能性あり

カッシーニ画像による渦合体の「形態学」
Li et al (2004)



ガリレオ軌道船データによる大赤斑風速場(ごく一部の領域では高密度データを取得)

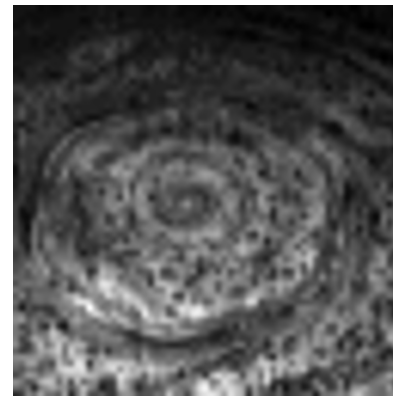
現在のJEO+JGOで欠けているパーツ

- 高速撮像カメラ

- 適切なフィルターとの組み合わせで雷の深度を決める。(力学・組成の両方の問題に寄与)

- 高緯度の観測

- JMOは軌道傾角が大きいので重要な寄与できる可能性。



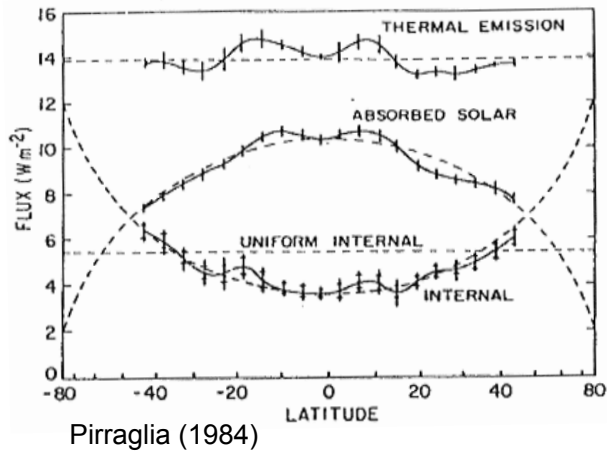
土星の北極



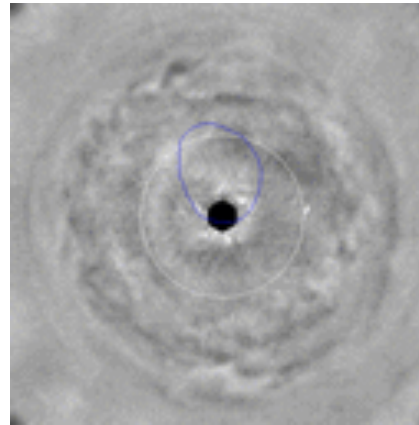
木星の極域はデータ無し

Images from Planetary Photo Journal

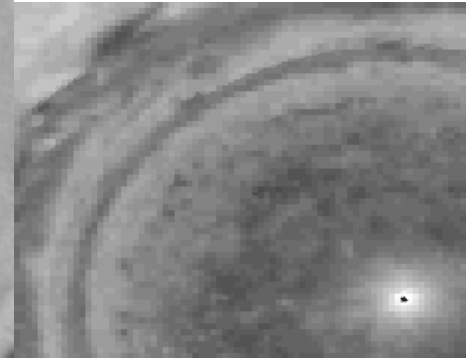
内部からの熱流出は
高緯度ほど大きい？



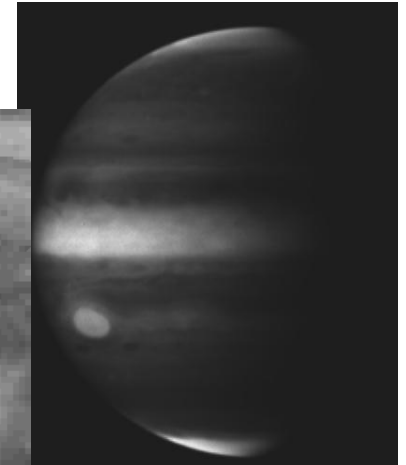
磁気圏との相互作用



極めて渦的な
大気運動

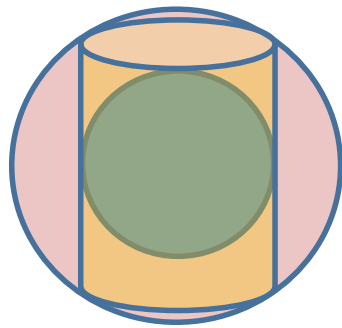


“polar hood”



Images by Cassini from Planetary Photo Journal

木星の高緯度の特異性



低緯度と高緯度
は、内部対流の
構造が違う？

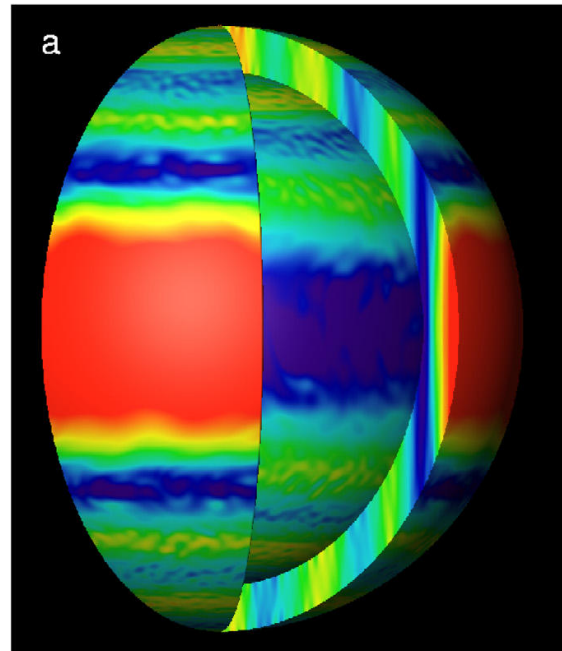
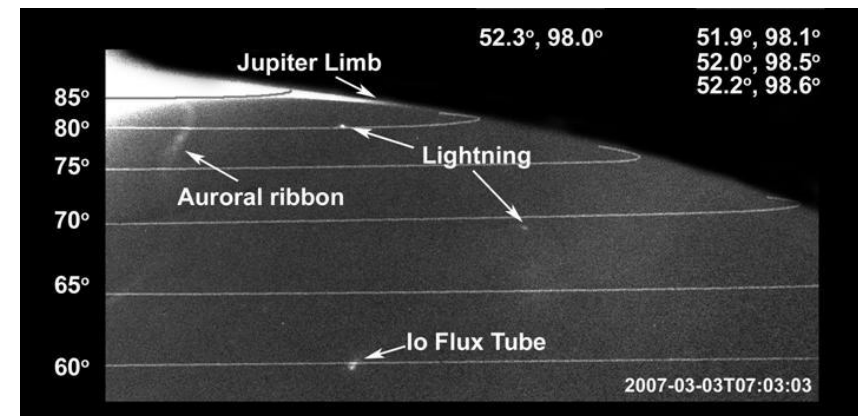


Image by NewHorizon from Planetary Photo Journal

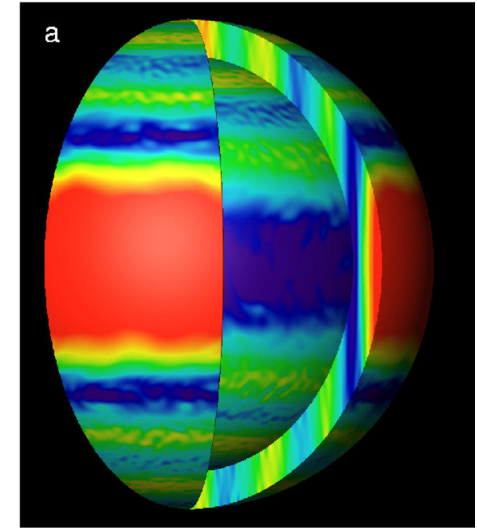


観測は断片的

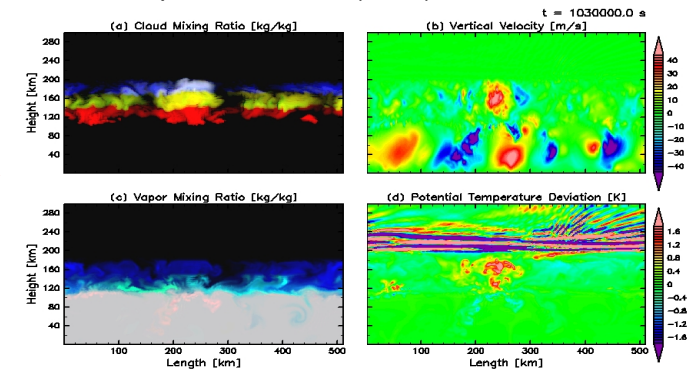
Heimpel and Aurnou (2007)

さらに将来を見据えて

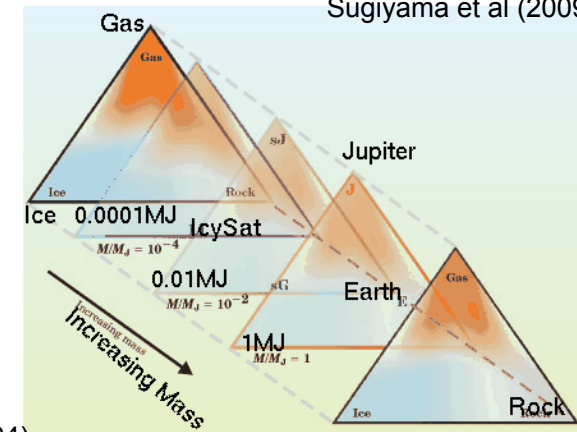
- 深部大気、惑星内部の包括的探査
 - プローブを再び
 - 木星マルチプローブ
 - 土・天・海: 全巨大惑星の「文脈」を
 - 新手法の開発: 分析装置の小型化、自由振動検出、ニュートリノで透過
- 数値モデリングの推進
 - 探査データをしゃぶりつくすにはモデルが不可欠
 - 系外惑星・太陽系史への適用も意識
- 系外惑星の探査・観測



Heimpel and Aurnou (2007)



Sugiyama et al (2009)



Stevenson (2004)

冰惑星

氷衛星探査のサイエンス

ハビタブル環境の調査

生命の兆候を捉える	内部構造の理解	進化史の把握
有機物の存否・分子構造	内部海の存否・構造・組成	表面の年齢, 地形年代
物質循環様式	氷地殻の構造とダイナミクス	内部分化の歴史
捕獲氷衛星の組成	中心核の構造・状態	現在の活動性

● トップサイエンスのターゲットたる氷衛星

- 木星系: Europa, Ganymede, Callisto
- 土星系: Enceladus, Titan, Phoebe
- 海王星系: Triton

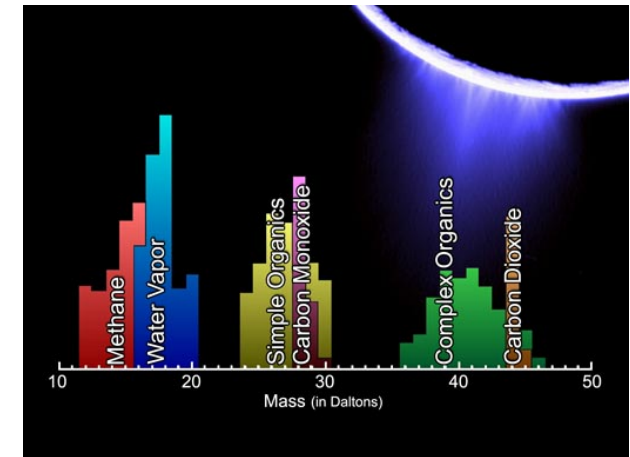
● 従来の氷衛星探査 (Voyager, Galileo, Cassini) での不備

- フライバイ探査 → 表面に対するデータカバー率が低い, 分解能が不均一
- 通信系のトラブル (Galileo) → データの少なさ

[1] 生命の兆候を捉える

● 有機物の存否・分子構造を見出す

- Titan, Enceladusで検出されたが分子構造は未確定(右図参照)
 - 高分解能質量分析
- Galileo衛星では未検出(塩のみ)



● 物質循環様式を理解

- Titanにおけるメタン循環の存在(但し光化学的に不安定)
メタン発生源の特定(火成活動か生命か)
 - 小型気体分析デバイスを用いた多地点でのトレーサー気体測定

Cassini探査機搭載
イオン・中性子質量
分析計によるEnce-
ladusプルームの質
量スペクトル

● 捕獲氷衛星の組成調査

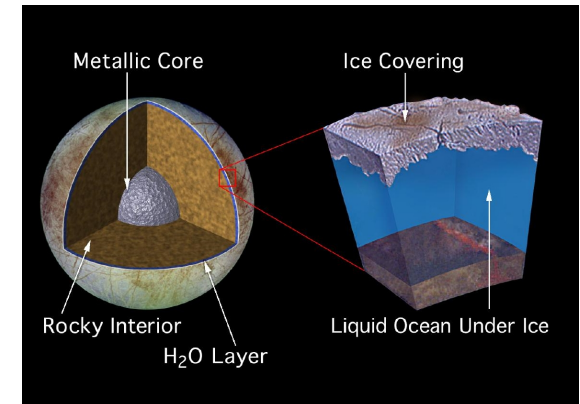
- 捕獲衛星はカイパーベルト起源である可能性(Phoebe, Triton)
- 太陽系のロゼッタストーンで有り得る
 - リモートセンシング観測による組成調査(Triton, (Pluto-Charon))
 - サンプルリターンによる組成精査(Phoebe)

➔ アstroバイオロジーパネルでのサイエンスも参照.

[2] 内部構造の理解

● 内部海の存否・構造・組成

- 固体氷－液体水境界面の検出
 - 氷地殻透過レーダー(地殻厚数kmまでは可)
- 潮汐力による表面変位の測定
 - レーザー高度計, 重力場解析
 - 海の有無に依存して変位量が桁で異なる
(海あり→変位大, 海なし→変位小: 海の深さ・厚さに対する精度はない)
- 内部海の組成調査(将来の潜行探査を見据えて)
 - 低温火山活動等を通して表出した海成分(有機物?)の同定
 - 天体衝突で射出された表面氷片のその場成分分析

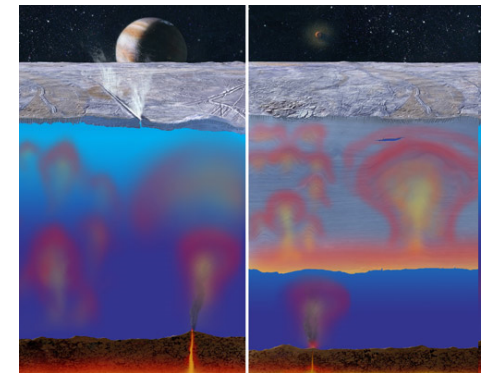


● 氷地殻の構造とダイナミクス

- 厚さとその水平不均質, 対流様式, 組成不均質
 - ニュートリノイメージングによる厚さ測定
 - 重力異常マッピングによる組成不均質(非H₂O物質)の検出

● 中心核の構造・状態

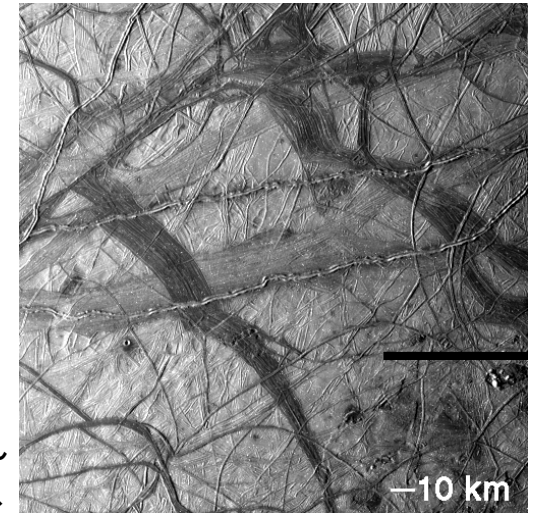
- Ganymede, Europa 金属核の状態
 - 周辺磁場観測による核内構造・ダイナミクスの理解
- 中小氷衛星(特にEnceladus)でのシリケート核の有無
 - 重力場解析(慣性能率の導出)による内部密度構造推定



[3] 進化史の把握

● 表面の年齢・地形年代

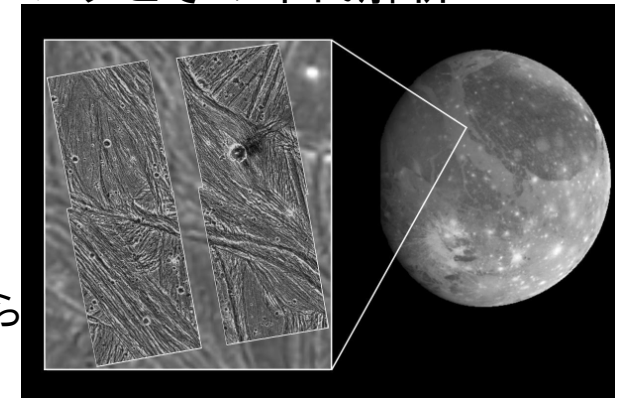
- H₂O主体のテクトニクス様式の理解
 - 均一かつ高解像度でのグローバルマッピングによる表面のクレータ年代決定と地形相関の精度向上.



Europa表面に見られる様々なテクトニクス

● 内部分化の歴史

- 内部海存在時期の解明 (Galileans, Enceladus, Titan, Triton?)
 - 衛星の体積変化 (膨張・収縮) で形成した地形のマッピングとその年代解析
- 金属核形成時期の解明 (Ganymede)
 - 地質二分性 (金属-岩石分離による体積変化が原因?) の深さ構造を, 重力異常の検出や地殻透過レーダーで探る.



Ganymede表面に見られる地質二分性

● 現在の活動性

- Currently activeな低温火山, 噴泉, テクトニクスの有無
 - 質量分析計によるH₂O噴泉の(有機物)成分分析 (Enceladus)
 - 表面熱流量観測等によるhot spotの検出→着陸探査に向けたサイト探索
 - Voyager, Galileo取得画像との比較 (近年の活動で更新された地形の発見)

タイタンのサイエンス

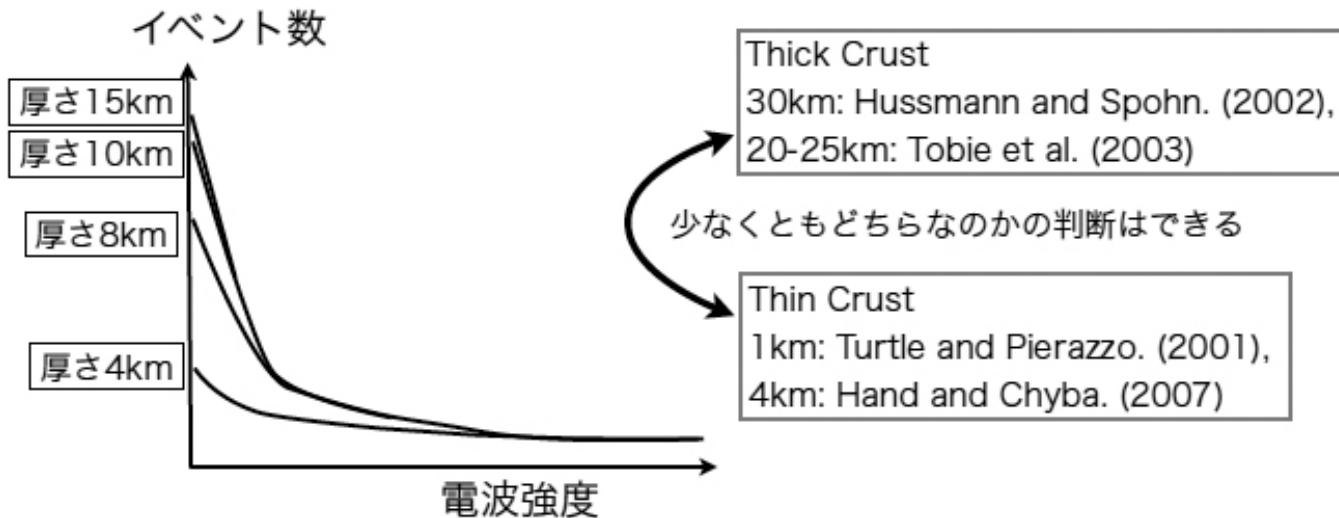
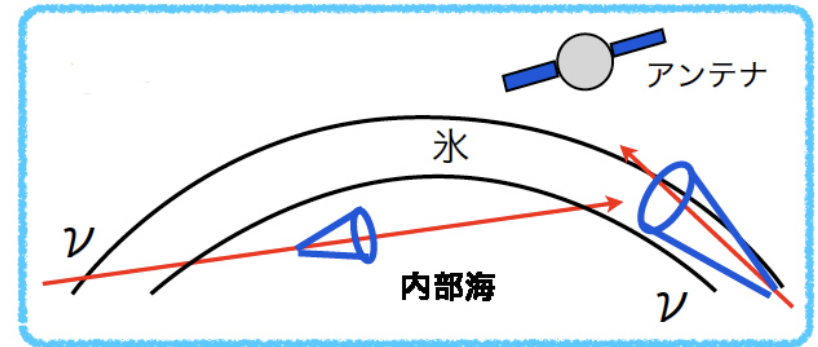
- 物質循環・大気循環・気候が存在する(生きている)地球外天体
 - 南極(夏極)でのメタン蒸発(雲生成)→大気大循環→北極(冬極)でのメタン凝縮・湖形成
 - 中低緯度には水氷の大陸や, 有機物氷・エアロゾルから成る堆積物・砂丘が存在
- 重要な問題
 - 表層環境の安定性と進化(定常か非定常か)
 - 大気の起源と進化(窒素大気の起源, メタンの源, 液体メタンの総量)
 - 有機物の素性(分子構造の特定, エアロゾルの組成)
- 次期探査計画での狙い
 - 季節変動の理解(2009年から夏冬極が逆転)
 - Cassini 延長ミッションで(ある程度)カバー
 - 大気循環, 物質循環の理解
 - 高緯度地域(冬極)の湖の調査 → 着陸機による組成調査
 - 中低緯度帯の堆積物の調査 → プローブによる堆積物厚さ, 組成調査
 - 低温火山活動の検出 → メタンフラックスの理解
 - Titan Saturnian System Mission (NASA/ESA)の検討も進行中.

諸外国での氷衛星探査計画状況

- Europa Jupiter System Mission (NASA/ESA (/JAXA/Roscosmos))
 - Europa周回機 (NASA), Ganymede周回機 (ESA), 磁気圏周回機 (JAXA), Europa着陸機(Roscosmos) による国際協同計画
 - 2020年の打ち上げを目標。
 - 地殻透過レーダーや重力場解析・高度計による内部海の検出
 - 全球画像取得, 組成マッピング
 - Ganymede磁気圏探査, , , ,
などが検討されている。
 - IoはJEOがフライバイ探査, CallistoはJGO, JMOがフライバイ探査予定
- Titan Saturnian System Mission (NASA/ESA)
 - Titan周回機, Titan大気観測気球, Titan湖沼領域着陸機
 - Enceladusはフライバイ時に観測
 - 2020年代の打ち上げを目標
 - EJSMが優先され, TSSMは継続study.

内部海の存否を決める観測提案

- 高エネルギーニュートリノによるEuropa表層氷層の構造決定
(栗田敬, 庄司大悟, 田中宏幸: 東大地震研, 木村淳: CPS/北大)
 - ニュートリノが物質と相互作用した際にAskaryan effectによってGHz帯に電磁放射が発生.
 - 周回機のアンテナでこの電磁波を検出.
 - 厚い氷殻(薄い内部海)では多数の相互作用が起きる(イベント捕捉可)
 - 薄い氷殻(厚い内部海)では相互作用が少ない(イベント捕捉不可).



高度計・重力場解析による潮汐変形の検出から内部海の存否を決め, さらに本手法によって氷地殻の厚さを制約する.

表面の潮汐応答に関する理論的予測

Europa		
$\mu_{ice} = 10^9 \text{ Pa}$ $R_{core} = 704 \text{ km}$ $D_{mantle} = 742 \text{ km}$ $D_{H_2O} = 119 \text{ km}$	潮汐応答 (peak-to-peak) (m)	Δg (mgal@100 km alt.)
1 km thick shell	29.6	-2.53
10 km	29.3	-2.55
100 km	27.2	-2.56
No ocean	0.636	-4.07

— 内部海の有無で潮汐変形度が大きく異なる (氷地殻厚さの依存性は小さい)

	Ganymede		Callisto	
$\mu_{ice} = 10^9 \text{ Pa}$	潮汐応答 (m)	Δg (mgal@100 km alt.)	潮汐応答 (m)	Δg (mgal@100 km alt.)
200 km thick ocean	7.6	-0.030	6.0	-0.042
20 km	7.4	-0.038	5.75	-0.049
No ocean	0.4	-0.232	0.25	-0.179

木星型惑星電磁氣圈

JMO (Jovian Magnetospheric Orbiter)による2020年代の木星電磁気圏探査

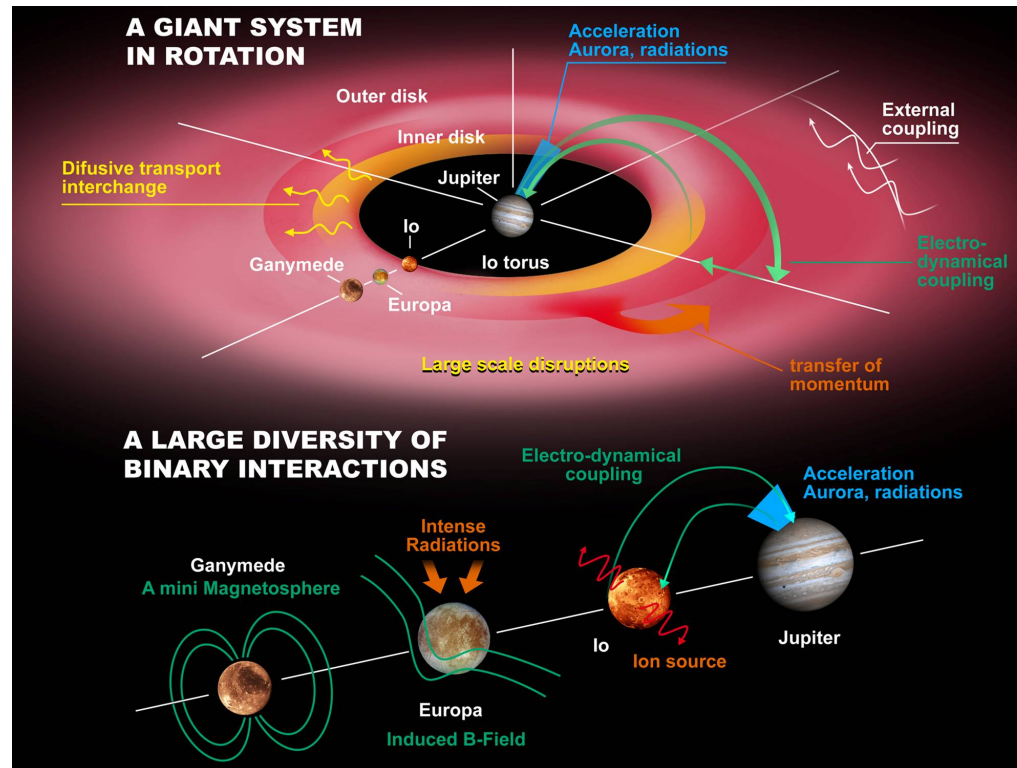
● 木星電磁気圏の特徴(おもしろさ)

- ・高速回転する巨大な磁気圏 -- パルサーに似た「自転エネルギー駆動」天体
- ・磁気圏全域で相対論的粒子 -- 太陽系最大最強の「高エネルギー粒子生成」天体
- ・木星本体と衛星との電磁氣的結合 --- hot jupiterに似た「電磁バイナリ」天体

・・・これらの特徴は

- > 系外惑星や天体磁気圏で起こっている基礎的な過程である。
- > 地球や水星磁気圏では起こっていない(何が同じで、何が違うのか)。

木星磁気圏を直接探査することが、物理の解明に本質的。



JMO (Jovian Magnetospheric Orbiter)による2020年代の木星電磁気圏探査

● JMOの科学目標:

- 1: 高速回転する巨大惑星磁気圏でのエネルギー輸送過程の解明
- 2: 太陽系惑星最強の粒子加速メカニズムの解明
- 3: 磁気圏・電離圏結合と衛星系との物質・電磁氣的結合過程の解明

● 背景と特徴:

- ・Galileo(1990年代)、JUNO(2010年代)に続く、木星磁気圏総合探査計画。
搭載機器、軌道、運用、他観測との連携において、Galileo、JUNOに対して差別化と優位性。
- ・EJSM計画のひとつ。
木星系の中での木星電磁気圏の理解するというスタンス。
複数衛星による多点磁気圏探査および太陽風-磁気圏相互作用究明を初めて実施。
- ・2010年代の地球磁気圏探査(ERG, SCOPE)、水星磁気圏探査(BC/MMO)、惑星望遠鏡(SPRINT-A)計画につながる問題意識。
惑星磁気圏で発動する電磁気システムの個別性と共通性。
系外惑星や高エネルギー天体にもつながる問題意識。

● 科学目標達成のための観測方法:

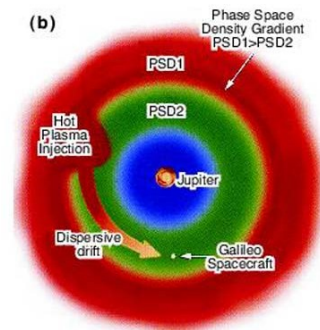
- ・直接観測(その場の詳細な物理量:分布関数や電磁場) --- JMO
- ・遠隔観測(電波やオーロラ/トラスの光学観測) --- JMO+地上観測
- ・多点観測(磁気圏の異なる領域、電離圏と磁気圏、太陽風と磁気圏)
--- JMOとJEO/JGOとの連携観測
地上との連携観測

JMO (Jovian Magnetospheric Orbiter)による2020年代の木星電磁気圏探査

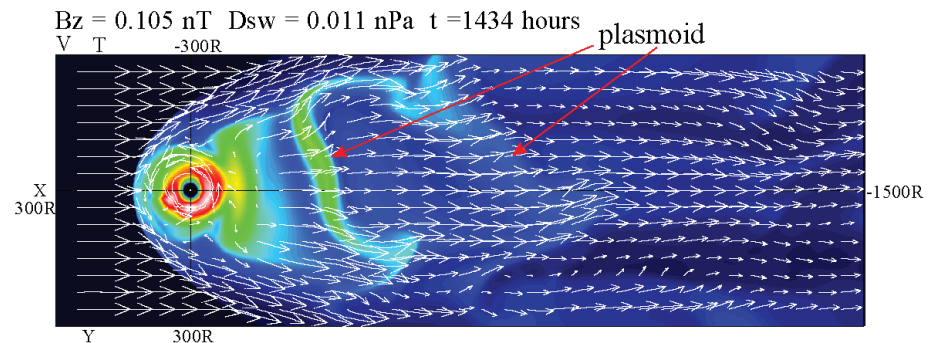
● 科学目標 1: 高速回転する巨大惑星磁気圏でのエネルギー輸送過程の解明

・自転が支配する磁気圏システム (パルサー磁気圏の理解につながる問題意識)

- 電離圏(惑星)から磁気圏へのエネルギー輸送メカニズム
惑星の角運動量は、どのように磁気圏の中へと輸送されていくのか？
- 磁気圏プラズマの輸送モードとその素過程
共回転プラズマ中での輸送モード(対流、拡散、注入)
- 磁気圏構造に及ぼす役割とダイナミクス
磁気リコネクションは、どのように起こっているのか？
木星風(Jovian Wind)



Mauk et al., 1999



Fukazawa et al., 2006

・太陽風 vs. 自転; どちらが重要なのか? (形外惑星研究につながる問題意識)

- 太陽風の変動は、磁気圏のどの領域にどのような影響を与えているのか？

JMO (Jovian Magnetospheric Orbiter)による2020年代の木星電磁気圏探査

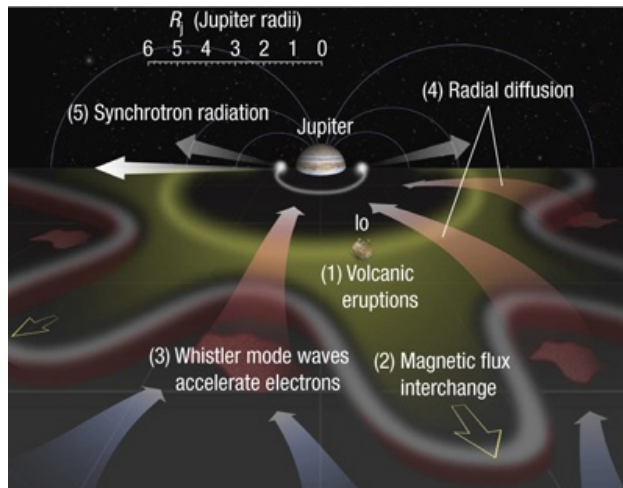
● 科学目標 2: 太陽系惑星最強の粒子加速メカニズムの解明

・相対論的粒子加速メカニズム

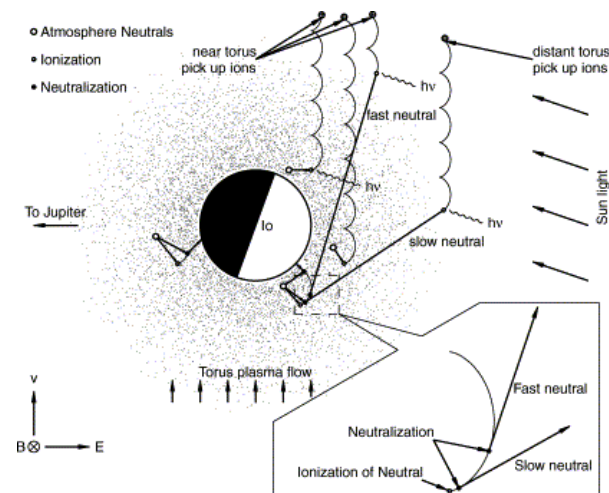
- 数十MeV以上の粒子は、どのように加速されているのか？
断熱輸送過程とプラズマ波動による非断熱加速, メソスケール不安定との結合
- なぜ、木星の全域にMeV粒子が存在しているのか？
非断熱輸送過程の存在。太陽系のMeV粒子の起源。
- 極域から放出される相対論的粒子の起源は何か？
なぜ、準周期的なのか？ オーロラとどのように関係しているのか？

・衛星起源プラズマ加速メカニズム

- ピックアップされた衛星大気起源プラズマは、どのように加速されるのか？



Horne et al., 2008



Russell et al., 2003

JMO (Jovian Magnetospheric Orbiter)による2020年代の木星電磁気圏探査

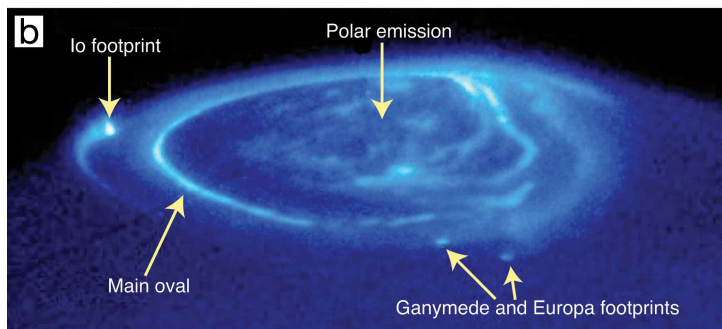
● 科学目標 3: 磁気圏・電離圏結合と衛星系との物質・電磁氣的結合過程の解明

・衛星による物質供給過程と磁気圏へのインパクト

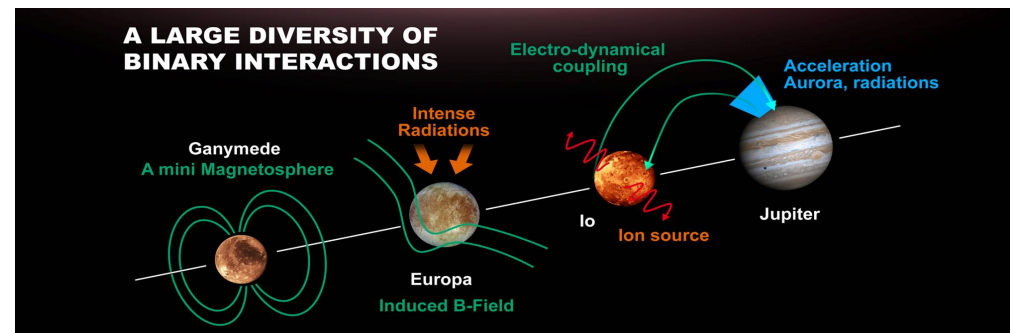
- 衛星起源中性大気の電離・加熱過程とMass Loadingの与える影響
- トーラスの形成とメソスケールプラズマ不安定によるプラズマ輸送・波動励起

・衛星と木星との電磁氣的な結合 (系外惑星につながる問題意識)

- FACを介した各衛星と木星電離圏の結合 (衛星footprintオーロラ)
- 木星- イオ衛星結合過程 (FAC/mass loading/電離圏伝導度の競合過程)
- 木星磁気圏-ガニメデ磁気圏相互作用
- ユーロパ周辺での木星背景磁場変動



Clark et al., 2004



JMO (Jovian Magnetospheric Orbiter)による2020年代の木星電磁気圏探査

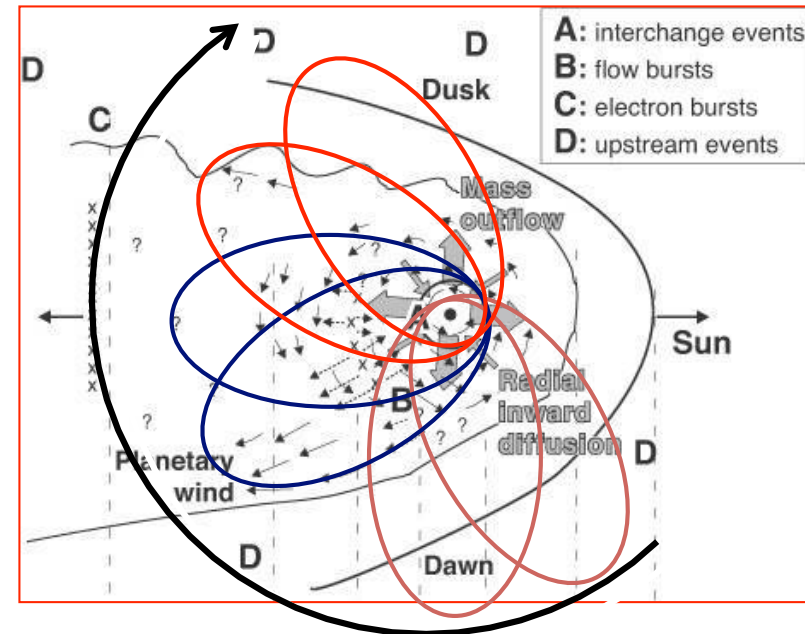
● 科学目標達成のための軌道計画:

[惑星間空間] 1. JMOによる太陽風観測

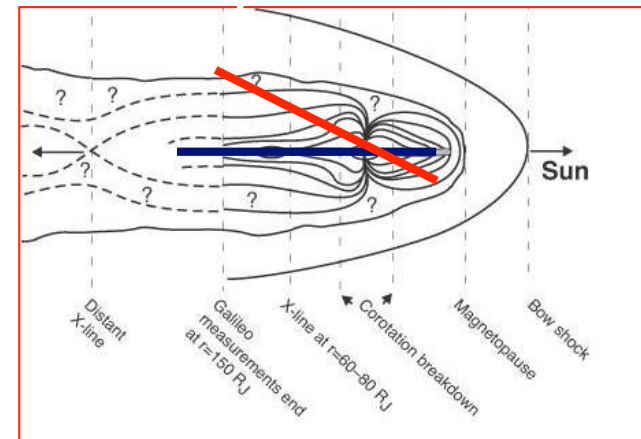
[初期投入] 近木点: ~ 6R_J
 遠木点: ~ 100 R_J
 遠地点地方時: 朝側
 衛星flyby時の観測

[定常観測] 近木点: Europa/Ganymede
 遠木点: ~ 100R_J
 遠地点地方時: 夜~夕方側

[赤道面離脱] 近木点: Europa/Ganymede
 遠木点: ~ 100 R_J
 傾斜角: ~ 30度
 極域の観測



2. 夜側を中心に磁気圏の広い領域を探査。
 各領域で起きている物理現象を精査。



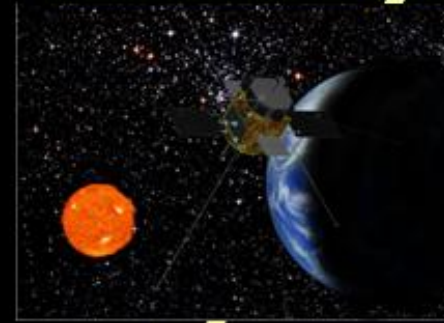
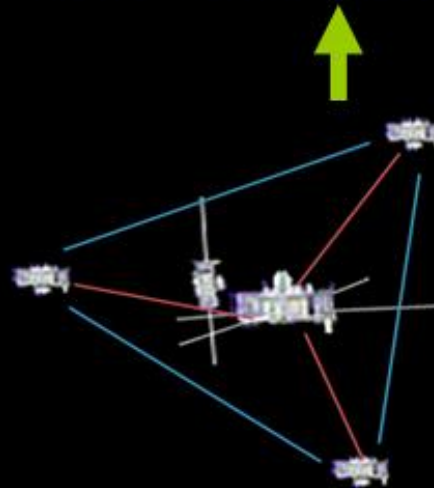
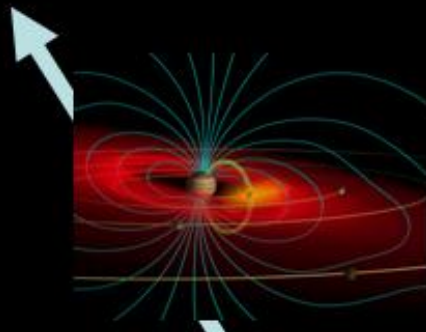
3. 電波とイメージングによる極域(オーロラ)、
 磁気圏のリモートセンシング

Future Space Plasma Missions at JAXA ~2020's

Planetary Magnetospheres

The Plasma Universe

Geospace Exploration



ESA/JAXA mission
to Jupiter in 2020's
(ESA CosmicVision2015-25, Ph A)

SCOPE/CrossScale ESA/JAXA
Multiscale at the same time
in Earth magnetosphere ~2017
(ESA CosmicVision2015-25 Ph.A)



BepiColombo L2014
ESA/JAXA mission to Mercury

ERG
A small explorer into
the inner-magnetosphere
and relativistic particle
acceleration processes
L2013

系外惑星

[A] 太陽系外の地球型惑星大気分光観測

観測：宇宙望遠鏡で地球型系外惑星大気を分光観測

- 地球大気の影響を受けない観測
- 大気組成を判別するだけの波長分解能
- たくさんの候補天体を観測

サイエンス：
発見

- 「生命を宿し得る(地球型)惑星」(さらには生命の兆候) の発見！

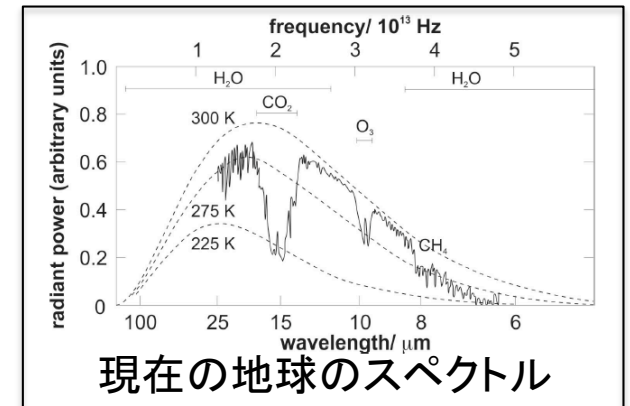
「我々は孤独なのか？」 --- 根源的問題意識

科学史に残る発見になるはず

日本の科学界(我々)も、是非とも関与し貢献したい！

詳細説明

- 「生命を宿し得る惑星」の多様性の理解
- 宇宙における「生命を宿し得る惑星」の頻度の評価



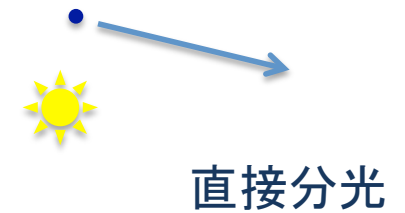
Jones (2009)

観測手法:

- 直接分光・測光

利点: 対象天体多い, 多くの情報が得られる

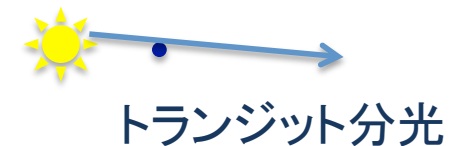
難点: 中心星と惑星の空間的近さ/高光度比が問題



- トランジット分光・測光

利点: 技術的には, 相対的に容易

難点: 観測可能天体は多くはない



海外の状況:

- 米欧は, 多段にわたる分厚い戦略 (参考スライド参照)

- 日本はどうか?

→ サイエンス・技術で存在感を示し, 国際協力で食い込む!

関連する提案:

[A-1] ガス惑星・氷惑星の直接分光・測光

- hot jupiter/neptune でないガス惑星/氷惑星の大気組成

[A-2] 惑星系の塵円盤(黄道光)の空間分解観測

-> 惑星系の形成/進化の解明

-> 直接撮像に対する黄道光の影響評価

「系外惑星」探査のサイエンス

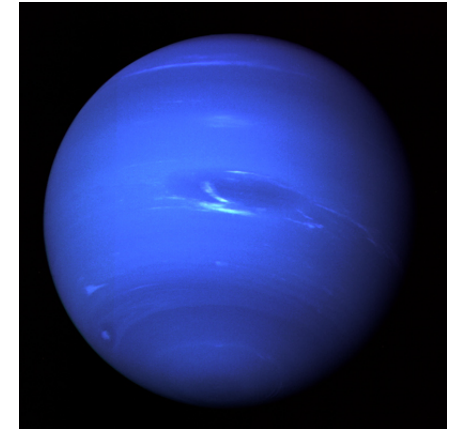
[B] (系外惑星の一類型としての) **氷惑星の探査**

探査:天王星 or 海王星のオービター・プローブ探査

- オービター: 重力場, 磁場, 大気(表層)を観測
- プローブ: 大気組成・同位対比などを
その場測定

サイエンス:

- 氷惑星の内部構造:
 - 密度, 圧力, 温度, 物質の推定
 - 磁場(非双極子でマントル起源?)の発生機構の解明
- 大気の組成・構造・運動・起源:
 - 惑星大気のもう一つの実例 -> 惑星大気一般論へ
 - 大気形成過程の理解 -> 惑星形成過程の解明



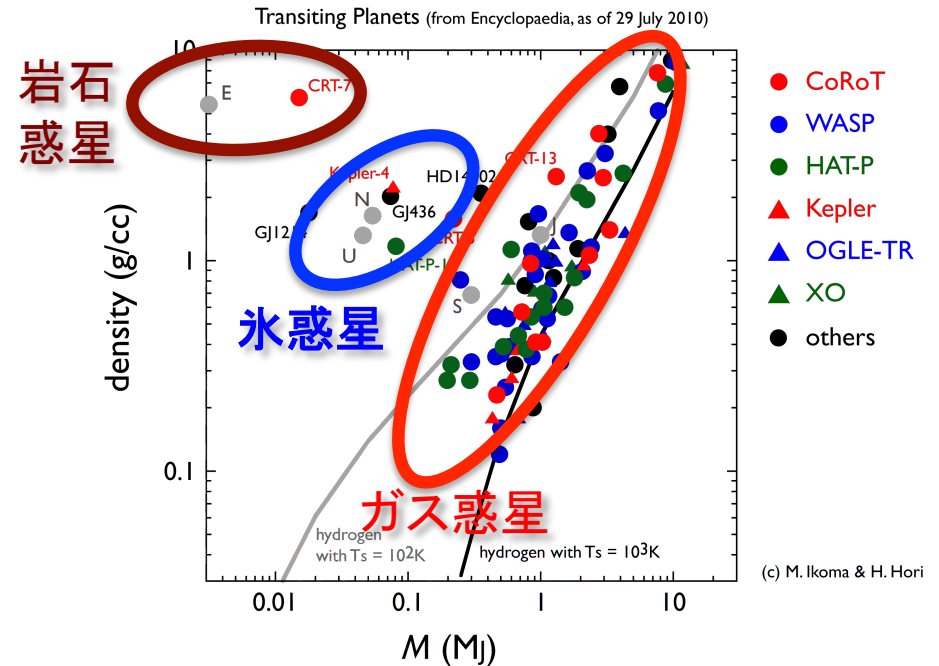
海王星 (NASA)

補足:

宇宙において「氷惑星」は、
岩石惑星・ガス惑星と並ぶ
3類型のうちの一つ(右図)。

「氷惑星」の理解は宇宙に
おける惑星の理解に不可欠。

しかし、太陽系内氷惑星の
探査はVoyager 2のフライバイ
1回のみ。



系外惑星の質量と密度の関係

(トランジット観測により値が求められたもの)

比較のため、太陽系内惑星の値も示されている。

E: 地球, U: 天王星, N: 海王星, S: 土星, J: 木星

生駒 & 堀 (2010)

「系外惑星」探査のサイエンス

地球型 系外惑星 大気分光 補足資料

今後10年

参考: 欧米の戦略

1. Habitable Zone に存在する地球型惑星の存在確率を評価
CoRoT, Kepler, RV観測&トランジット観測(地上望遠鏡)
2. HZに存在する地球型惑星を持つ(近傍の明るい)恒星の特定
Astrometry型ミッション (SIM[?], GAIA[2012])
3. Exo-Zodiacal light (系外黄道光) の影響評価
Spitzer, JWST, SPICA
4. M型星周囲の habitable 惑星探査
Spitzer, JWST, SPICA



実現可能性向上, 最適化

20年後

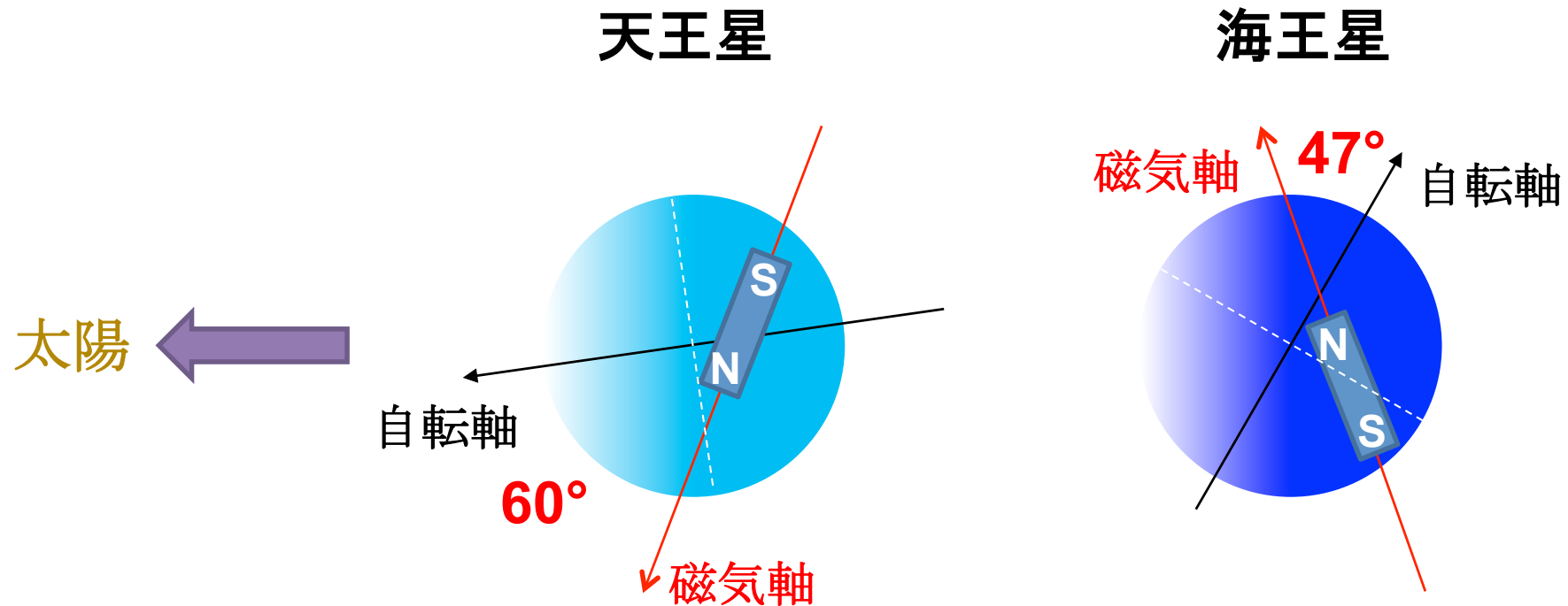
太陽型(F,G,K)恒星周囲の habitable 地球型惑星観測:
分光観測, 表面撮像, ...

氷惑星 補足資料

観測量

	天王星 (Uranus)	海王星 (Neptune)
軌道長半径	19.2 AU	30.1 AU
質量	14.5 M _{Earth}	17.1M _{Earth}
赤道半径@1bar	2.56x10 ⁵ km	2.48x10 ⁵ km
平均密度	1.27 g/cc	1.64 g/cc
自転周期	17.24±0.01hr	16.11±0.05
自転軸傾斜角	97.86°	29.56°
重力モーメント J ₂ x10 ⁶	3516±3	3538±9
重力モーメントJ ₄ x10 ⁶	-31.9±5	-38±10
有効温度	59.1 (±0.3) K	59.3 (±0.8) K
エネルギーバランス	1.06 (±0.08)	2.61 (±0.28)
赤外放射フラックス	0.042 (±0.047) W/m ²	0.433 (±0.046) W/m ²
表面組成	ほぼ太陽組成(H/He)だが, CH ₄ は約30倍過剰	

観測量：惑星磁場



	天王星	海王星
ダイポールモーメント	$0.23 \text{ gauss } R_U^3$	$0.13 \text{ gauss } R_N^3$
自転軸に対する磁気軸の傾き	60°	47°
惑星中心に対するオフセット	$0.3 R_U$	$0.6 R_N$

